

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2016.02.2015082002

刁星, 苑春刚, 桂兵, 等. 燃煤电厂固体废物中汞分布特征及排放量估算[J]. 环境化学, 2016, 35(2): 229-236

DIAO Xing, YUAN Chungang, GUI Bing, et al. Mercury distribution in solid waste and mercury emission estimation from coal-fired power plants [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(2): 229-236

燃煤电厂固体废物中汞分布特征及排放量估算*

刁 星 苑春刚** 桂 兵 张可刚

(华北电力大学环境科学与工程学院, 保定, 071003)

摘 要 采用湿法消解, 原子荧光光谱法测定了 5 个燃煤电站入炉煤、粉煤灰、炉渣和脱硫石膏中汞的含量, 分析探讨了汞在燃煤及不同固体废物中的分布特征. 采用质量平衡模型 (MB)、修正因子模型 (EMF) 和烟气计算模型 (FC) 分别对以上电站的汞排放量进行了估算, 并对不同方法得到的排放量进行了对比. 研究结果显示, 3 种方法所得汞排放量结果差距明显, 亟需建立更加完善的燃煤电站汞污染排放模型.

关键词 燃煤电厂, 汞排放, 估算.

Mercury distribution in solid waste and mercury emission estimation from coal-fired power plants

DIAO Xing YUAN Chungang** GUI Bing ZHANG Kegang

(School of Environmental Science & Engineering, North China Electric Power University, Baoding, 071003, China)

Abstract: The concentrations of mercury in coal, fly ash, slag and gypsum were determined by atomic fluorescence spectrometry after wet digestion. The distribution characteristics of mercury in various waste and coal samples were studied and discussed. Three estimation models including Mass Balance (MB) model, Emission Modification Factors (EMF) model, and Flue Calculation (FC) model were applied to calculate the emission amounts of mercury from five coal fired power plants. The calculated emission amounts generated from three models were compared and discussed. The results indicated that the values from different models for the same plant varied significantly. It is urgent to develop more effective and practical models for mercury emission estimation.

Keywords: coal-fired power plant, mercury emission, estimation.

人为汞排放源主要是工业和民用燃煤^[1]. 中国作为燃煤大国, 以燃煤为主的能源结构在未来很长时间内不会改变. 因此, 由燃煤发电引起的汞排放受到了政府和研究机构的高度关注. 《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223—2011) 规定燃煤锅炉执行 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的汞排放限值^[2-5]. 有鉴于汞污染的高毒性和持久性, 国内外学者针对燃煤电厂汞排放和迁移特性进行了较多的研究^[6-7]. 深入研究燃煤发电过程中汞排放特征是改进环保措施、全面执行环保标准的前提, 同时, 也是构建区域乃至全国燃煤电厂汞污染排放清单的关键.

燃煤发电过程中汞的排放、分布和迁移受人炉煤煤质、燃烧炉型、污染控制设备等因素的影响显著. 随着燃煤电厂逐步完善静电除尘和脱硫等环保设施, 单位煤耗的烟气汞排放量将呈下降趋势^[8]. 与此同

2015 年 8 月 20 日收稿 (Received: August 20, 2015).

* 国家自然科学基金 (21277043, 21407047); 北京市自然科学基金 (8132038) 资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (21277043, 21407047), the Beijing Natural Science Foundation (8132038).

** 通讯联系人, Tel: 0312-7525512, E-mail: chungangyuan@hotmail.com

Corresponding author, Tel: +86-312-7525512, E-mail: chungangyuan@hotmail.com

时,更大比例的汞将被迁移进入燃煤和污染控制副产物.存在于副产物中的汞会随飞灰、底渣及石膏进行二次迁移和再释放.因此,准确测定燃煤发电过程中汞在不同固废中的分布情况有助于全面评估燃煤发电汞污染释放特征,同时也是准确评估汞排放量的重要参数.

由于燃煤汞释放过程复杂,影响因素多,烟气中汞排放的瞬时变化剧烈,测定难度大.为了节省成本并获得具有参考价值的汞排放数据,国内外学者借助不同模型对电厂汞排放量进行了估算,对污染评估和政策制定具有较好的参考价值.目前估算燃煤电站汞排放的模型主要有质量平衡、排放修正因子、烟气估算等 3 个模型.

本实验以 5 座装有静电除尘器和湿法脱硫装置(石灰石-石膏法)的燃煤电站为研究对象,分析测定了燃烧过程中汞在燃煤、底渣、飞灰和脱硫石膏中的分布情况,分别采用以上 3 种模型对烟气汞排放进行了估算,并对不同估算模型所得的结果进行了比对.

1 实验部分(Experimental section)

1.1 样品采集

所选电厂的装机容量均在 300 MW 以上,且配有静电除尘器(ESP)和湿式脱硫装置(WFGD).为研究方便,电厂分别编号为 A、B、C、D、E.采集上述 5 个电厂满负荷运行工况下入炉煤、锅炉底渣、粉煤灰和脱硫石膏样品.入炉煤采自于混煤后、入炉前的输煤带;炉渣采自于渣坑(湿渣)或输渣皮带(干渣);粉煤灰采自于静电除尘器粉煤灰采样口;脱硫石膏取自石膏真空皮带机.为确保样品的承接性,在采集煤样 30 min 后再依次采集灰、渣、石膏样品,各样品均采集 5 kg.采集后迅速放入聚乙烯(PE)样品袋中密封,运至实验室,冷冻保存.

1.2 样品处理

渣和石膏样品经冷冻干燥至恒重后过 80 目筛,置入密封袋保存;经含水率测定,所采集的灰和煤的含水率均低于 5%,因此煤和粉煤灰不需要进行干燥处理.将采集的煤和粉煤灰样品分别充分混合,采用四分法进行制样,并经研磨过筛(80 目),放入密封袋,存于干燥器中,备用.

1.3 汞的测定

实验所用试剂均为优级纯.由于汞吸附性强,分析过程容易受到污染.玻璃容器在 50%(V/V)硝酸中浸泡 24 h 后经去离子水充分清洗后使用.

实验采用原子荧光光谱法进行样品中汞的测定.称取适量固体样品,加入王水进行消解.将消解后的样品溶液用去离子水定容.每组样品测试 3 次,相对偏差在 $\pm 10\%$ 以内表明数据有效;每隔 5 个样品测定 1 次标准溶液,相对偏差在 $\pm 10\%$ 以内表明仪器运行良好.为了进一步保证测定结果的准确性,每批次样品均测定了土壤标准参考物质(GBW-07405),汞参考值为 $0.29 \pm 0.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,回收率在 80%—120%之间.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 发电燃煤汞含量

煤质分析结果见表 1.5 个电厂的入炉煤汞含量在 $0.06\text{—}0.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均含量为 $0.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.不同来源的煤中汞含量差异明显.在 5 个煤样中,汞最高含量与最低含量相差近 4 倍.本研究所得煤中汞的平均含量与文献报道的我国燃煤平均汞含量($0.16\text{—}0.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)相一致^[9-10],且含量与灰分呈显著正相关关系($R^2 = 0.84, P < 0.05$),与干基挥发分呈显著负相关关系($R^2 = 0.85, P < 0.05$).结果显示,所研究燃煤样品中的汞主要来自于煤中的无机矿物.有研究报道煤中汞主要来自于煤中黄铁矿^[11],然而,在本研究中并未发现全硫与汞含量存在显著相关.这可能主要是因为燃煤中硫的成分来源复杂导致.

2.2 发电燃煤过程中汞的迁移

汞是一种易挥发元素,在燃煤过程中,微量汞将会被气化进入烟气,除一部分以氧化态汞(Hg^{2+} 或 Hg_2^{2+})存在以外,绝大部分汞以元素态汞(Hg^0)存在于锅炉的高温气相中.存在于气相中的部分 Hg^0 被吸

附在颗粒物表面,其中,有一部分 Hg^0 在热辐射作用下被颗粒物表面的金属氧化物催化氧化为氧化态汞 (Hg^{2+} 或 Hg_2^{2+})。经过在锅炉高温区的短暂停留,随烟气进入烟道。在随烟气排放的过程中,温度逐渐降低,部分 Hg^0 被吸附在细小烟尘颗粒表面,形成颗粒态汞 (Hg^p)。颗粒态汞被锅炉后方的静电除尘器 (ESP) 除掉,除尘效率可以高达 99% 以上。因此,ESP 对颗粒态汞的去除效率显著。报道显示,安装有 ESP 的电厂烟气中汞的排放量可以减少 23% 及以上。经过 ESP 以后,烟气中的气态汞 (包括气态 Hg^0 和 Hg^{2+}) 和未被 ESP 捕获下来的超细颗粒物吸附态 Hg 进入随后的脱硫装置。由于氧化态 Hg^{2+} 具有很高的水溶性, Hg^{2+} 被迅速溶解进入脱硫浆液,同时,部分来自 ESP 逃逸的细颗粒也溶解进入浆液,随脱硫过程一起转移至石膏和废水中。未被溶解和吸附的气态元素汞,通过烟囱排放进入大气。可见,经过燃烧,来自燃煤的汞经除尘和脱硫过程后,在炉渣、粉煤灰和脱硫石膏中进行了再分配。

表 1 不同电厂燃煤煤质分析

Table 1 Quality analysis of coals from coal-fired power plants

电厂 Power plant	煤中汞含量 Mercury in coal/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全水分 Moisture content/%	灰分 Ash content/%	干基挥发分 Dry base volatile/%	全硫(干基) Total sulfur/%	固定碳 Fixed carbon/%	低位发热量 Lower heating value/ ($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
A	0.24	7.00	36.30	12.02	1.04	—	19.21
B	0.16	7.00	28.88	12.92	—	57.24	21.60
C	0.14	10.92	18.23	24.64	0.47	—	22.42
D	0.06	17.86	17.02	41.23	1.31	43.47	18.38
E	0.08	20.57	15.10	38.19	0.46	—	20.27

注:“—”为未测数据。

2.3 燃煤固废中汞的分布特征

本研究采样点在燃煤发电过程中的分布如图 1 所示。

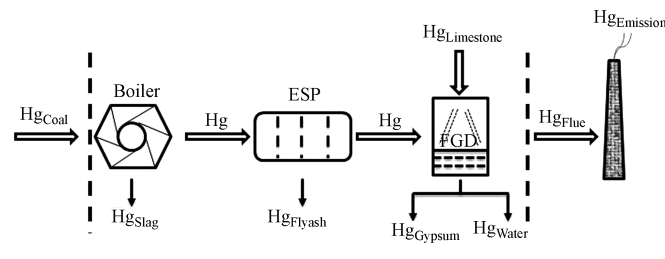


图 1 燃煤电站采样点及汞迁移示意图

Fig.1 Sketch map of sampling sites and mercury transportation

来自 5 个电厂的脱硫废水和石灰石样品中未检出汞,因此,本研究汞的物相分配包括燃煤、粉煤灰、炉渣、脱硫石膏。采用测汞仪对消解样品中的汞进行测定,不同样品中汞含量分析结果见表 2。

表 2 样品分析结果 ($n \geq 3$, $\text{RSD} \leq 15\%$)Table 2 Contents of mercury in various samples ($n \geq 3$, $\text{RSD} \leq 15\%$)

电厂 Power plant	装机容量 Installed capacity/ MW	燃煤量 Coal consumption/ ($\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$)	煤中汞含量 Mercury content in coal/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	粉煤灰产量 Fly ash yield/ ($\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$)	灰中汞含量 Mercury content in fly ash/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	炉渣产量 Slag yield/ ($\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$)	渣中汞含量 Mercury content in slag/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	石膏产量 Gypsum yield/ ($\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$)	石膏汞含量 Mercury content in gypsum/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
A	300	2500.00	0.24	220.00	0.27	67.83	0.02	83.33	3.00
B	300	2200.46	0.16	219.18	0.07	41.10	0.01	41.10	1.48
C	600	4685.61	0.14	5.93	0.33	52.42	0.09	148.77	2.10
D	330	3250.00	0.06	150.00	0.12	40.00	0.02	66.00	0.22
E	350	3500.00	0.08	193.52	0.97	68.30	0.01	105.75	0.08

在不同电站发电过程中,随着装机容量的增加,耗煤量也在增加。A、B 两个电厂装机容量相同,燃煤量相近,电厂 A 耗煤量略高于电厂 B。燃煤汞含量分别为 $0.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。二者产灰量基本相同,但粉煤灰中汞含量差别显著。同样,在炉渣、脱硫石膏中汞的含量也相差明显。可见,燃煤发电汞分

布不仅与入炉煤中汞含量有关,而且受煤质成分、燃烧状况和环保设施运行效率等因素共同影响。

炉煤汞含量与石膏汞含量呈显著正相关($R^2 = 0.89, P < 0.05$).纵然装机容量相同,煤中汞含量也相近,由于炉型、燃烧方式、燃烧状态、环保设备工作效率和燃煤煤质等方面的差异,导致 Hg 在不同物相中的迁移分布不同。

汞在所述 5 个电厂固废中的迁移量如表 3 所示.燃煤中的汞经燃烧在粉煤灰、炉渣和脱硫石膏中进行了再分配.从 5 个电厂的实验结果来看,存在于炉渣中的汞所占比例在 0.13%—0.74%之间,结果与文献[12-17]一致(0.10%—0.90%).存在于粉煤灰和脱硫石膏中的汞出现了明显的分异.粉煤灰中汞所占比例为 0.30%—63.80%,脱硫石膏中汞所占比例为 2.95%—46.51%.汞在粉煤灰和脱硫石膏中所占比例存在如此大的极差,表明汞在燃煤过程中的迁移和分布是极其复杂的物理化学过程,受影响条件较多。

表 3 汞在固废中的迁移量

Table 3 Migration of mercury in various wastes

电厂 Power plant	A	B	C	D	E
粉煤灰 Fly ash/%	10.03	4.44	0.30	9.23	63.80
炉渣 Slag/%	0.21	0.13	0.74	0.50	0.17
脱硫石膏 Gypsum/%	41.56	17.30	46.51	7.26	2.95

飞灰吸附汞的能力主要受飞灰粒径,飞灰未燃尽碳含量以及飞灰成分等因素的影响.飞灰越细,比表面积越大,在炉内悬浮时间越长,吸附效果就越好,汞在飞灰中的富集现象越明显.有研究表明随着锅炉容量增大粉煤灰在炉膛的停留时间也随之增加,燃烧更加充分,飞灰含碳量降低^[18].C 电厂的锅炉容量最大,粉煤灰的汞含量也就最低.而 A、E 电厂由于机组老化,锅炉燃烧效率低,易造成飞灰含碳量较高,导致汞富集因子增大。

炉渣的汞含量特别低,主要是由于在炉膛内高于 800 °C 的高温燃烧区,煤中的汞几乎全部转变为元素汞 Hg^0 并停留在烟气中,炉膛底部排渣口,随温度的降低,周围气化的汞会少部分凝结在底灰颗粒表面,其余绝大部分随烟气在锅炉烟道下游被传输到烟气污染控制设备。

脱硫石膏对氧化态汞有很好的脱除效果,而汞的形态分布又与锅炉系统的烟气温度、烟气组分、飞灰活性与比表面积,以及其它微量元素等有较大关系^[19].研究发现^[20],锅炉负荷的变化对脱汞效率影响不明显,但随着机组负荷的增加,湿法烟气脱硫入口气态汞的含量增加.正常的脱硫石膏外观应接近白色,但因为飞灰和其它杂质的存在,大部分脱硫石膏呈灰色或灰黄色.C 电厂石膏颜色呈暗灰色,应是掺杂了飞灰,造成石膏汞含量增大.E 电厂的石膏汞含量很低,主要是由于大量汞分布在粉煤灰中,在进入脱硫设备之前已经被静电除尘器去除。

2.4 汞在不同物相中的分配特征和迁移量

忽略脱硫过程石灰石引入的汞和脱硫废水所排放的汞,假设锅炉燃煤过程的汞输入与输出存在质量平衡,燃煤中的汞经燃煤发电过程燃烧后在固相和气相中的再分配特征和迁移量如图 2 所示.燃煤中的汞经再分配以后,约 33%—83%的汞最终被排放进入大气。

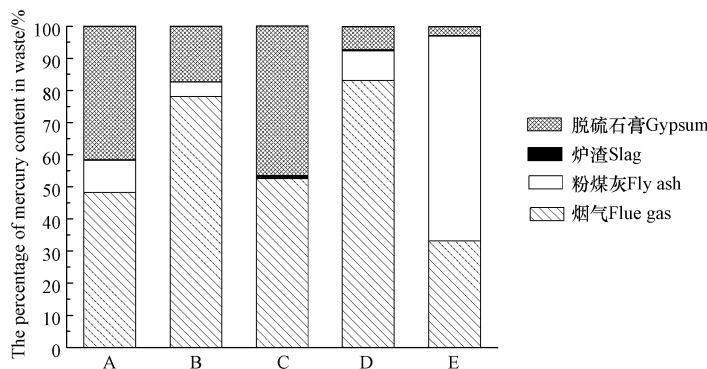


图 2 汞在固废和烟气中的迁移量

Fig.2 Distribution of mercury in flue gas and solid waste

根据表 2 中的分析结果,结合煤耗、粉煤灰产量、渣产量和脱硫石膏产量,计算得出不同电厂汞燃煤输入量和不同固废排放输出量,结果如表 4 所示。

表 4 汞的输出和输入量

Table 4 Input and emission of mercury through different phases

电厂 Power plant	A	B	C	D	E
煤输入汞量 Mercury input via coal/(g·d ⁻¹)	600.75	350.53	664.42	196.63	294.07
灰输出汞量 Fly ash mercury emission/(g·d ⁻¹)	60.28	15.56	1.96	18.14	187.62
渣输出汞量 Slag mercury emission/(g·d ⁻¹)	1.29	0.45	4.89	0.98	0.51
石膏输出汞量 Gypsum mercury emission/(g·d ⁻¹)	249.66	60.64	309.00	14.28	8.67
烟气输出汞量 Flue gas mercury emission/(g·d ⁻¹)	289.52	273.88	348.57	163.23	97.27

2.5 燃煤电厂汞排放量估算

2.5.1 质量平衡模型 (Mass Balance, MB)

根据图 1 中汞的迁移特征,建立燃煤发电过程中汞质量平衡方程。

$$Hg_{T-Input} = Hg_{Coal} + Hg_{Limestone} = Hg_{T-emission} \quad (1)$$

$$Hg_{T-emission} = Hg_{Solid-emission} + Hg_{Liquid-emission} + Hg_{Gas-emission} \quad (2)$$

$$Hg_{Solid-emission} = Hg_{Slag} + Hg_{Fly\ ash} + Hg_{Gypsum} \quad (3)$$

$$Hg_{Gas-emission} = Hg_{Flue} \quad (4)$$

因为在本实验中,脱硫废水中汞的含量未被有效检出,因此 $Hg_{Water} \approx 0$ 。燃煤电厂烟气汞释放为:

$$Hg_{Flue} = Hg_{T-Input} - Hg_{Solid-emission} = Hg_{Coal} - (Hg_{Slag} + Hg_{Fly\ ash} + Hg_{Gypsum}) \quad (5)$$

根据方程(5),结合表 2 中的数据,可估算出 5 个电厂烟气汞排放量分别为 289.52、273.88、348.57、163.23、97.27 g·d⁻¹。如果按照电厂年运行天数为 360 d 进行计算,则年排放量分别为 104.23、98.60、125.49、58.76、35.02 kg·a⁻¹。

2.5.2 排放修正因子模型 (Emission modification factors, EM)

排放修正因子 EMF (Emission modification factors) 表示燃煤电站烟气中的汞排放到大气中的排放率,也体现了该电厂的清洁燃烧效率和环保设备贡献率。例如,某装置可以使原有烟气中汞排放减少 10%,则该装置的排放修正因子为 $1 - 0.1 = 0.9$ ^[21]。排放因子模型建立了由燃煤到烟气汞排放的直接联系。最常用的修正因子烟气汞排放估算模型如下:

$$Hg_{Gas-emission} = M_{Coal} \times C_{Hg-coal} \times \prod_{EMFi}$$

式中, $Hg_{gas-emission}$ 为单个燃煤电站锅炉汞排放量 (g); M_{Coal} 为煤在估算时间内日平均消耗量 (t·d⁻¹); $C_{Hg-coal}$ 为煤平均汞含量 (mg·kg⁻¹); \prod_{EMFi} 为各个有效修正因子 (EMF) 的乘积。利用排放因子估算模型得到的电厂烟气汞排放量结果如表 5 所示。

表 5 采用排放因子模型估算电厂烟气汞排放

Table 5 Estimation of mercury emission by EMFs model

电厂编号 Power plant	APCD 类型 APCD type	燃烧器类型 Burner type	烟气汞排放量估算值 Estimation values of Emission amounts/(kg·a ⁻¹)
A	ESP+WFGD	四角切圆	107.90
B	ESP+WFGD	四角切圆	62.96
C	ESP+WFGD	四角切圆	119.33
D	ESP+WFGD	四角切圆	35.31
E	ESP+WFGD	四角切圆	52.82

2.5.3 烟气计算模型 (Flue calculation, FC)

根据煤炭燃烧的理论空气需求量 V_0 (m³·kg⁻¹) 和产生的实际烟气体积 V_Y (m³·kg⁻¹) 计算如下^[22-23]。

(1) 理论空气需求量

干燥无灰基挥发分 ($V_{daf}, \%$) > 15% 的烟煤:

$$V_0 = 0.251 \times \frac{Q_{\text{net}}}{1000} + 0.278$$

式中, Q_{net} 为收到基低位发热量 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$).

$V_{\text{daf}} < 15\%$ 的贫煤和无烟煤:

$$V_0 = \frac{Q_{\text{net}}}{41415} + 0.61$$

(2) 实际烟气体量

无烟煤、烟煤及贫煤:

$$V_Y = \frac{1.04Q_{\text{net}}}{4187} + 0.77 + 1.0161(\alpha - 1)V_0$$

式中, α 为过剩空气系数, 燃煤锅炉 $\alpha = 1.8$.

煤炭中含汞量与其燃烧排放的汞浓度的关系如下:

$$B = \frac{10^3 \times C_0 \times P}{V_Y}$$

式中, B 为汞排放质量浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}_N^{-3}$); C_0 为煤炭的含汞量 ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); P 为煤炭燃烧的大气汞排放比例, 取 83% [24].

5 个电厂烟气汞排放浓度和年排放量如表 5 所示.

表 5 烟气计算模型估算汞排放量

Table 5 Estimation of mercury emission by flue calculation model

电厂编号 Power plant	$V_0 /$ ($\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	$V_Y /$ ($\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	$B /$ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}_N^{-3}$)	年排放量 Annual emission / ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)
A	5.24	9.80	20.34	179.40
B	5.82	10.87	12.17	104.79
C	5.91	11.14	10.57	198.62
D	4.89	9.31	5.39	58.71
E	5.37	10.17	6.86	87.91

2.5.4 3 种模型排放量估算对比分析

图 3 显示的是用 3 种方法分别估算得到的 5 个燃煤电厂烟气汞年排放量. 同一电厂采用不同模型估算结果的偏差较大. 采用烟气计算模型的估算结果明显较其它两种模型估算结果数值偏高. 就所研究的 5 个电厂而言, 烟气计算模型结果分别比质量平衡模型高 72.12% 、 6.28% 、 58.28% 、 -0.09% 、 151.03% , 比修正因子模型高 66.27% 、 66.44% 、 66.45% 、 66.27% 、 66.43% . 针对 A、C 电厂, 质量平衡模型和修正因子模型所得排放量基本一致. B、D 电厂, 质量平衡模型和烟气计算模型的结果相当. 3 种模型均基于燃煤中的汞含量水平进行估算, 模型参数存在明显不确定性, 受具体工艺过程影响较大.

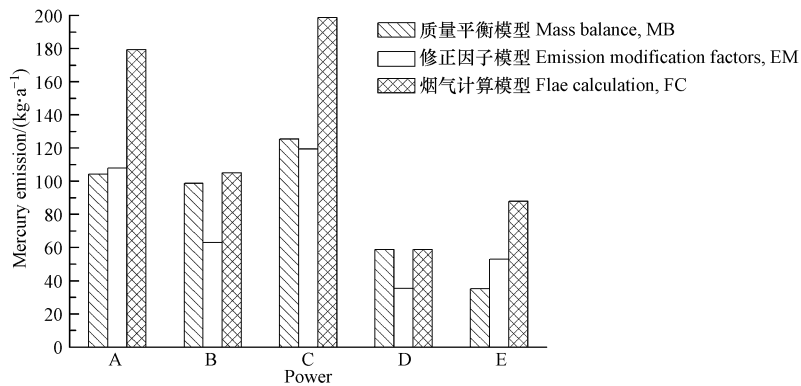


图 3 3 种方法烟气汞年排放量估算结果对比

Fig.3 Comparison of the annual mercury emission amounts evaluated by 3 models

胡长兴等^[17]通过利用排放因子模型,计算分析指出燃煤电站的总汞排放量(气态汞和固态汞排放量之和)基本上同燃煤机组的容量呈比例,每 100 MW 机组总汞排放量在 40—50 kg·a⁻¹左右.并指出,除尘设备与湿法脱硫设备共用时可以使气态汞排放量明显下降至总汞排放量的 30%左右,也就是气态汞的排放量为 12—15 kg·a⁻¹.而本实验通过质量平衡法得到结果则显示,每 100 MW 机组气态汞排放量为 10—35 kg·a⁻¹.一般来讲,对电站燃煤烟气现场采样和分析难度较高,基体复杂,影响因素多,分析结果偏差大^[25].烟气计算模型参数多为经验值,未考虑具体电站锅炉和环保设施运行状态的影响,适合多污染源、大区域的粗略估算.修正因子模型考虑了燃煤基质、锅炉类型、燃烧方式、清洁系数、环保设施等因素的贡献,较烟气计算模型更符合实际生产状况.然而,修正因子只是有限电厂实际测试结果的统计数据,同样存在片面性和不准确性.而质量平衡模型所需参数大部分来自实际测定结果,具有较高的可信度.工况参数也具有很高的可靠性,且方便获取.但实际测定结果也存在一定的不确定性,比如不同介质中汞浓度的瞬时变化、分析测定过程中的样品损失和误差等.总之,3 种不同的估算方法各自存在优缺点.随着环境污染的日趋严重和国际环保标准的压力,尽快建立准确、有效的燃煤电站估算模型非常必要.

3 结论 (Conclusion)

炉渣中汞所占比例在 0.13%—0.74%之间,粉煤灰中汞所占比例为 0.30%—63.80%,脱硫石膏汞所占比例为 2.95%—46.51%,燃煤中的汞经再分配以后,约 33%—83%的汞最终被排放进入大气.

用烟气计算模型的估算结果明显较其它两种模型估算结果高,5 个电站计算结果分别比质量平衡模型高 72.12%、6.28%、58.28%、-0.09%、151.03%,比修正因子模型高 66.27%、66.44%、66.45%、66.27%、66.43%.3 种模型参数存在明显不确定性,尽快建立准确、有效的燃煤电站估算模型势在必行.

参考文献 (References)

- [1] PACYNA E G, PACYNA J M, STEENHUISEN F, et al. Global anthropogenic mercury emission inventory for 2000 [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(22): 4048-4063.
- [2] FANG G C, YANG I L, LIU C K. Estimation of atmospheric particulates and dry deposition particulate-bound mercury Hg(p) in Sha-Lu, Taiwan [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2010, 10(5): 403-413.
- [3] LEE W J, BAE G N. Removal of elemental mercury (Hg (0)) by nanosized V2O5/TiO2 Catalysts [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(5): 1522-1527.
- [4] DIAMANTOPOULOU I, SKODRAS G, SAKELLAROPOULOS G P. Sorption of mercury by activated carbon in the presence of flue gas components [J]. *Fuel Processing Technology*, 2010, 91(2): 158-163.
- [5] KONG F H, QIU J R, LIU H, et al. Catalytic oxidation of gas-phase elemental mercury by nano-Fe₂O₃ [J]. *Journal of Environmental Sciences-China*, 2011, 23(4): 699-704.
- [6] WU Y L, RAHMANINGRUM D G, LAI Y C, et al. Mercury emissions from a coal-fired power plant and their impact on the nearby environment [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2012, 12(4): 643-650.
- [7] TANG N, PAN S W. Study on mercury emission and migration from large-scale pulverized coal fired boilers [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2013, 41(4): 484-490.
- [8] 高炜,支国瑞,薛志钢,等.1980—2007 年我国燃煤人气汞、铅、砷排放趋势分析[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(8): 822-828.
GAO W, ZHI G R, XUE Z G, et al. Analysis of atmospheric emission trends of mercury, lead and arsenic from coal combustion in China from 1980-2007 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(8): 822-828 (in Chinese).
- [9] 郭欣,郑楚光,贾小红,等.300 MW 煤粉锅炉烟气中汞形态分析的实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(6): 189-192.
GUO X, ZHENG C G, JIA X H, et al. Study on mercury speciation in pulverized coal fired flue gas [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(6): 189-192 (in Chinese).
- [10] 王超起,马如龙.煤及其灰渣中的汞[J]. *中国环境科学*, 1997, 17(1): 77-79.
WANG Q C, MA R L. The mercury in coal and its cinder [J]. *China Environmental Science*, 1997, 17(1): 77-79 (in Chinese).
- [11] GLODEK A, PACYNA J M. Mercury emission from coal-fired power plants in Poland [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(35): 5668-5673.
- [12] 张迪生,谢馨.南京某燃煤电厂汞的排放特点及分布特征[J]. *环境监测管理与技术*, 2014, 26(3): 64-67.
ZHANG D S, XIE X. Distribution features and emitting characteristics of mercury in a Nanjing coal-fired power plant [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2014, 26(3): 64-67 (in Chinese).

- [13] 张乐. 燃煤过程汞排放测试及汞排放量估算研究[D]. 杭州:浙江大学硕士学位论文,2007.
ZHANG L. Research on mercury emission measurement and estimate from combustion resources[D]. Hangzhou: Master degree thesis of Zhejiang University, 2007(in Chinese).
- [14] 樊保国, 刘军娥, 乔晓磊, 等. 电厂煤粉锅炉汞排放特性研究[J]. 环境污染与防治, 2014;36(7):61-63, 73
FANG B G, LIU J E, QIAO X L, et al. Mercury emission characteristics of the power plant pulverized coal fired boiler[J]. Environmental Pollution & Control, 2014;36(7):61-63, 73(in Chinese).
- [15] 李文俊. 燃煤电厂和水泥厂大气汞排放特征研究[D]. 重庆:西南大学硕士学位论文,2011.
LI W J. Characterization of atmospheric mercury emissions from Coal-fired Power plant and Cement plant[D]. Chongxing: Master dissertation of Southwest University, 2011(in Chinese).
- [16] 葛业君, 董众兵, 郑刘根, 等. 淮南市电厂和炉渣中汞的分布规律[J]. 环境化学, 2009, 28(3):453-454
GE Y J, DONG Z B, ZHENG L G, et al. Distribution of mercury in slag and Huainan power plants[J]. Environment Chemistry, 2009, 28(3):453-454(in Chinese).
- [17] 胡长兴, 周劲松, 何胜, 等. 我国典型电站燃煤锅炉汞排放量估算[J]. 热力发电, 2010, 39(3):1-4, 8.
HU C X, ZHOU J S, HE S, et al. Estimation of mercury emission from coal-fired boilers in typical power plants of China[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(3):1-4, 8(in Chinese).
- [18] 吕俊复, 冯俊凯. 煤粉炉中燃烧产物停留时间及其对飞灰含碳量的影响[J]. 锅炉技术, 2005, 36(6):21-24.
LYU J F, FENG J K. Resident time of combustion products and its effect on carbon content in fly ash in pulverized coal fired boilers[J]. Boiler Technology, 2005, 36(6):21-24(in Chinese).
- [19] CHEN L, DUAN Y, ZHUO Y, et al. Mercury transformation across particulate control devices in six power plants of China: The co-effect of chlorine and ash composition [J]. Fuel, 2007, 86(4):603-610.
- [20] 井鹏, 王凡, 朱金伟, 等. 300 MW 燃煤机组烟气控制装置对气态汞去除效果[J]. 环境工程学报, 2015, 9(1):307-311.
JING P, WANG F, ZHU J W, et al. Removal of gaseous mercury for pollution control systems of two sets of 300 MW coal-fired units[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(1):307-311(in Chinese).
- [21] 任建莉, 周劲松, 骆仲泱, 等. 燃煤电站汞排放量的预测模型[J]. 动力工程, 2005, 25(4):587-592.
REN J L, ZHOU J S, LUO Z Y, et al. Forecasting model for mercury emission by coal-fired power plants[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2005, 25(4):587-592(in Chinese).
- [22] 齐书芳, 岳涛, 王凡, 等. 燃煤工业锅炉烟气中汞排放情景分析[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(7):103-106.
QI S F, YUE T, WANG F, et al. Scenario analysis of mercury emission from coal-fired industrial boiler flue gas[J]. Environmental Pollution & Control, 2014, 36(7):103-106(in Chinese).
- [23] 同济大学, 湖南大学, 重庆建筑工学院. 锅炉及锅炉房设备(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1986:23-25.
Tongji University, Hunan University, Chongqing Institute of Architecture and Engineering. Boiler and Boiler-room Equipment (Second Edition) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1986:23-25(in Chinese).
- [24] 蒋靖坤, 郝吉明, 吴焯, 等. 中国燃煤汞排放清单的初步建立[J]. 环境科学, 2005, 26(2):34-39.
JIANG J K, HAO J M, WU Y, et al. Development of mercury emission inventory from coal combustion in China[J]. Environmental Science, 2005, 26(2):34-39(in Chinese).
- [25] WANG Y, DUAN Y, YANG L, et al. Mercury speciation and emission from five coal-fired power plants in China[C]. 6th International Symposium on Coal Combustion, Wuhan, CHINA, 2007:859-868.